

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 551.345.3

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ИНЪЕКЦИОННЫХ ЖИЛ ЛЬДА
И ГИДРОЛАККОЛИТОВ

С.М. Фотиев

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия, kriozem@gmail.com

Изучен механизм формирования инъекционных жил льда и гидролакколитов, пронизывающих или деформирующих пласт льда. Определен основной источник воды, формирующий ультрапресный лед в пластах, жилах и ядрах гидролакколитов. Показаны результаты воздействия инъекционного потока воды (внедрившегося в пласт льда по зияющей трещине) на лед пласта и нижние слои пачки мерзлых суглинков. Рассмотрены последствия внедрения гидролакколита в пласт льда и пачку мерзлых суглинков.

Повторно-инъекционный пласт льда, инъекционная жила льда, деформации слоев льда и суглинка, гидролакколит

MECHANISM OF FORMATION OF INJECTIVE ICE VEINS AND HYDROLACCOLITHS

S.M. Fotiev

Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia, kriozem@gmail.com

The mechanism of formation of injective ice veins and hydrolaccoliths, piercing through the ice sheet and deforming it, has been examined. The main source of water forming the ultrafresh ice in the sheets, veins, and cores of hydrolaccoliths has been determined. The results of impact of the injective water flow (piercing into the ice sheet through the yawning fissure) upon the ice sheet and the lower layers of the frozen loam unit have been demonstrated. The results of the intrusion of hydrolaccolith into the ice sheet and the frozen loam unit have been considered.

Repeatedly injective ice sheet, injective ice vein, deformations of ice and loam layers, hydrolaccolith

ВВЕДЕНИЕ

Север Западно-Сибирской низменности – область широкого развития залежей подземных льдов (ЗПЛ). Они обнаружены и исследованы в породах различного возраста (от среднего неоплейстоцена до голоцена), разного генезиса (морские, прибрежно-морские, ледниковые, аллювиальные и т. д.). Они имеют различную форму (линзы, жилы, пласты и др.), разную мощность льда (от нескольких метров до 40–50 м) [Баду и др., 1982] и видимую протяженность (от нескольких метров до 100–200 м, а в некоторых обнажениях до 1–2 и даже 3 км). В ЗПЛ содержится разный объем льда, который в некоторых залежах, по подсчетам С.Ю. Пармузина и С.Е. Суходольского [1982], превышает 4 млн м³. Согласно классификации, предложенной Б.И. Втюриным и Е.А. Втюриной в 1980 г., подземные льды различаются по месту образования (внутригрунтовые и на поверхности), по синхронности с формированием вмещающих мерзлых пород (первичные, вторичные – внутригрунтовые и включенные – погребенные), по роли подземных вод в формировании криоген-

ных текстур (текстурообразующие и залежеобразующие), по типу льдообразования (сегрегационные, инъекционные, сегрегационно-цементные и цементные) и т. д. [Гляциологический словарь, 1984]. Каждая ЗПЛ имеет специфические черты, так как условия их формирования различные.

Среди многообразия ЗПЛ особое место занимают пласты подземного льда, сформировавшиеся в результате многократных (повторных) инъекций ультрапресной воды из ближайших термокарстовых озер или подозерных таликов в толщу мерзлых (промерзающих) засоленных морских отложений [Фотиев, 2003]. Только такое ледяное тело, “ограниченное двумя более или менее параллельными плоскостями напластования, имеющее одинаковую мощность и занимающее большие площади” [Гляциологический словарь, 1955, с. 147], в отличие от всех остальных ЗПЛ, можно и следует называть повторно-инъекционным пластом льда (ПИПЛ). Это наиболее крупные скопления подземных льдов. Они имеют самую большую мощность льда (до 50 м), наиболее значительную протяженность (до 3 км),

а объем льда в некоторых пластах достигает нескольких миллионов кубометров. Несмотря на значительную мощность и огромные объемы подземного льда, ПИПЛ не выражены в рельефе останцов салехардской и казанцевской морских равнин и террас, сохранившихся *in situ* до настоящего времени. В останцах пласты льда залегают в полном соответствии с горизонтально залегающими пачками глин, суглинков, супесей и песков морского генезиса, перекрывающих и подстилающих их.

Поэтому неудивительно, что при обследовании и мелких, и крупных обнажений в долинах рек, на берегах озер и Карского моря основное внимание уделялось изучению пластов льда. Детально исследовались морфология пласта, его форма и размеры, а также строение, состав и криогенная текстура ледяной залежи. Менее подробно изучался химический состав самих льдов различного генезиса: отдельных прослоев льда в пласте и текстурообразующих льдов в суглинках.

При изучении пластов льда исследователи невольно обращали внимание на жилы льда, пронизывающие пласт льда, и на мощные гидролакколиты, на склонах которых горизонтальные слои или сильно наклонены, или “поставлены на голову”. Однако анализу генезиса, химического состава льда и механизма формирования жил льда и гидролакколитов должного внимания не уделялось.

Долгое время оставались загадкой причины и механизм деформаций пластов льда. Залежи пластового льда делили на простые (без деформации слоев) и сложные, когда одна часть залежи сложена горизонтально залегающими, а другая – деформированными слоями льда [Втюрин, Гасанов, 1962; Дубиков, Корейша, 1964; Баулин, Дубиков, 1970; Баду и др., 1982; Гасанов, 1982]. Деформацию слоев в пласте льда объясняли либо диапиризмом [Дубиков, 1982], либо образованием в пласте льда гидролакколитов [Дубиков, Корейша, 1964; Баулин, Дубиков, 1970; Втюрин, 1975; Баду и др., 1982]. Однако ни один из геокриологов, предлагавших ту или иную гипотезу, не ответил на вопрос: откуда к подошве ледяного пласта поступал такой огромный объем ультрапресной воды, при промерзании которой формировался мощный гидролакколит? Найти ответ они и не могли, поскольку практически все исходило из того, что слоистый лед пласта и инъекционный лед в жилах сформировались за счет воды, образовавшейся в результате диагенетического преобразования пород, насыщенных соленой морской водой.

Основные задачи статьи следующие. 1. Изучить механизм формирования жил льда, пронизывающих

пласт льда от подошвы до кровли, и гидролакколитов, способных “поставить на голову” не только ледяной пласт мощностью в несколько десятков метров, но и мощную пачку мерзлых суглинков. 2. Ответить на вопросы: как и почему деформировались слои в пласте льда? Это взаимосвязанные вопросы, так как источник воды в обеих задачах один и тот же – вода термокарстовых озер или (и) подозерных таликов [Фотиев, 2003], только масштабы процесса разные.

ИНЪЕКЦИОННЫЕ ЖИЛЫ ЛЬДА

Инъекционные жилы льда (ИЖЛ)¹, пронизывающие мощные горизонтально залегающие пласты льда от подошвы до кровли, – явление на севере Западной Сибири достаточно распространенное. По внешнему виду ледяные жилы очень схожи с кварцевыми жилами, пронизывающими в горных районах массивы кристаллических пород. Форма, размеры и углы наклона жил по отношению к практически горизонтальному контакту слоистого пласта льда и пачки мерзлых суглинков различны. Толщина жил изменяется от нескольких сантиметров до нескольких метров, а углы наклона – от 40 до 90°.

Жилы льда были отмечены и описаны геокриологами, начиная с 1964 г., в разных районах Ямала – практически во всех более или менее крупных обнажениях пластовых льдов [Втюрин, Гасанов, 1962; Дубиков, Корейша, 1964; Баулин и др., 1967, 1989; Баду и др., 1982; Дубиков, 1982; Корейша и др., 1982, 1983; и др.]. В этих работах в самом общем виде приводятся сведения о ширине жил, углах их наклона по отношению к кровле пласта льда, а также информация о химическом составе и минерализации льда. Однако изучению и детальному описанию жил льда должного внимания не уделялось. Ю.Б. Баду, В.Т. Трофимов и Ю.К. Васильчук пишут: “Лед пласта нередко насквозь прорван вторичными вертикальными штоками интрузивного облика. Подошва сетчатых суглинков в этом месте антиклинально изогнута, характеризуется следами сильного гидравлического удара. На кровле пласта – песчаные прослойки” [1982, с. 16]. Наиболее тщательно жилы льда были изучены и тщательно описаны М.М. Корейшей с соавт. [Корейша и др., 1982, 1983]. Исследовав более 30 обнажений в районе оз. Нейто, они отметили, что “ледяные и ледогрунтовые тела” (ИЖЛ) имеют разную форму, различные размеры и в зависимости от объема воды, внедрившейся в пласт льда, приводят к различным деформациям не только внутри пласта, но и в суглинках, перекрывающих пласт.

¹ Здесь и в дальнейшем мы будем использовать термин “инъекционная жила льда”, имея в виду лед, сформировавшийся в зияющей трещине, пронизывающей пласт льда от подошвы до кровли, в результате замерзания в ней напорной инъекционной воды. М.М. Корейша с соавторами в своих работах используют различные термины: “ледяные и ледогрунтовые образования” [Корейша и др., 1983, с. 74] или “инъекционные тела в виде штоков” [Там же, с. 83].

М.М. Корейша, А.Н. Хименков и Г.С. Брыксина [1982, 1983] изучили и подробно описали две наиболее типичные, с их точки зрения, жилы льда, уделив основное внимание описанию одной из них – наиболее простой по форме, но содержащей большую информацию о механизме своего образования. При увеличении масштаба рисунка из статьи [Корейша и др., 1983, рис. 1] и дополнении его детальным описанием обнажения, приведенным в тексте, получилась достаточно информативная картина обнажения (рис. 1, А, Б).

В обнажении высотой до 30 м, расположенном на берегу оз. Нейто в 4 км к северу от истоков р. Сеяха, пласт льда (видимая мощность до 4 м), состоящий из слоев прозрачного и мутного льда (ледогрунта) (3а и 3б на рис. 1, А), перекрыт пачкой мерзлых суглинков казанцевского возраста мощностью 15–20 м (2а и 2б на рис. 1, А). Выше, вблизи поверхности морской равнины, залегает пачка песков (1 на рис. 1, А). В этом обнажении детально изучена жила льда, толщина которой в нижней части 5–10 см (4 на рис. 1, А). Она пересекает слоистый пласт льда под прямым углом. В кровле пласта льда в слоях, контактирующих с

жилой, и в нижних слоях пачки суглинков отчетливо выделяются зоны с существенной деформацией криогенных текстур (6 и 7 на рис. 1, А).

В кровле пласта льда по обе стороны от жилы выявлена зона значительной деформации криогенных текстур (7 на рис. 1, А). Ширина зоны 2 м, а глубина (от кровли пласта) – 1 м. В зоне деформации вертикальные шлиры, характерные для слоев льда в пласте, сильно изменены. Они образуют систему, в которой шлиры льда радиально расходятся от жилы. Толщина шлиров в зоне деформации достигает 3–4 см, а в ледяных прослоях пласта она не превышает 2,5 см, что свидетельствует о медленной скорости кристаллизации льда.

Лед в зоне деформации содержит много угловатых блоков суглинка размером до 10 см, которые как бы плавают во льду (8 на рис. 1, А). По цвету и составу они схожи с суглинками, перекрывающими пласт льда, тогда как в жиле лед содержит мелкие, округлые, окатанные агрегаты суглинка более темного цвета по сравнению с суглинком в кровле пласта льда. Агрегаты этого суглинка размером до 4 мм отмечены на всем протяжении жилы льда (9 на рис. 1, А). Очевидно, пи-

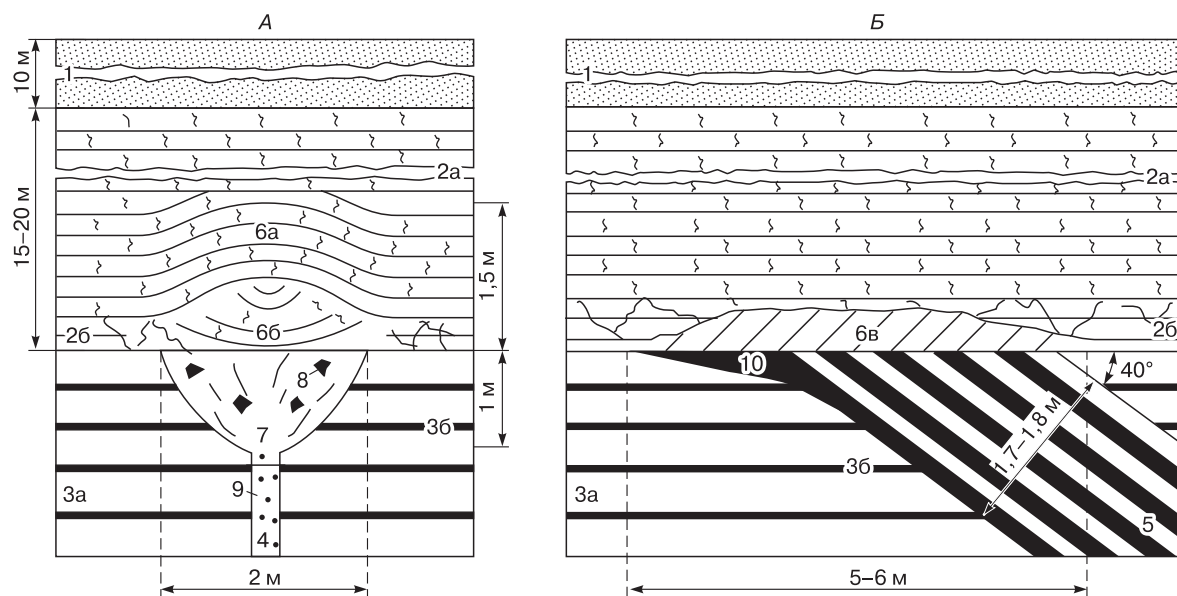


Рис. 1. Результаты внедрения по зияющим трещинам, рассекающим пласт льда, потока напорной воды в обнажениях казанцевской равнины на берегу оз. Нейто [Корейша и др., 1983, рис. 1 (обработка С.М. Фотиева)].

А – однократное внедрение прозрачной воды по трещине толщиной 5–10 см; Б – многократное внедрение мутной воды с большим содержанием суглинка по трещине толщиной 1,7–1,8 м.

1 – песок; 2 – горизонтально-слоистый суглинок с сетчатой (а) и атакситовой (б) криогенной текстурой; 3 – пласт льда, состоящий из слоев прозрачного (а) и мутного (б) льда (ледогрунта); 4 – инъекционная жила прозрачного льда; 5 – инъекционная жила льда с большим содержанием суглинков, отличающихся по составу от суглинков в кровле пласта; 6 – зоны деформации криогенной текстуры суглинка (а – слои залегают куполовидно, б – слои прогнуты вниз, в – минеральные отдельности смещены и повернуты относительно друг друга); 7 – зона деформации пластового льда (кристаллы образуют систему, радиально расходящуюся от жилы льда); 8 – крупные (до 10 см) угловатые блоки суглинков, состав которых соответствует составу суглинков в кровле ледяного пласта; 9 – мелкие (1–4 мм) округлые агрегаты суглинка, которые отличаются по цвету (более темные) от суглинков в кровле пласта льда; 10 – скопления различных по составу суглинков (из кровли пласта и привнесенные водным потоком).

шет М.М. Корейша с соавт. [1983, с. 82], они “привнесены из нижележащего горизонта” (из какого горизонта не указано. – С.Ф.).

Вдоль всей кровли пласта льда в суглинках с атакситовой криогенной текстурой (2б на рис. 1, А) “наблюдаются многочисленные зоны дробления, в которых минеральные отдельности смещены и повернуты относительно друг друга. Это указывает на инъекционное воздействие той же воды, которая формировала пластовую залежь” [Корейша и др., 1982, с. 45].

В пачке мерзлых суглинков, непосредственно над зоной деформации криогенных текстур в пласте льда, также отчетливо прослеживается зона деформации криогенных текстур (6а и 6б на рис. 1, А). Высота зоны над кровлей пласта 1,5 м, ширина 2 м (такая же, как у зоны деформации пластового льда). Зона деформации состоит из двух ярусов: в верхнем горизонтальные слои суглинка изогнуты в виде купола (6а), а в нижнем они прогнуты в виде синклинали складки (6б на рис. 1, А).

Формирование пластов льда, а также “ледяных и ледогрунтовых образований” (жил льда), по мнению М.М. Корейши и его соавторов, произошло на протяжении трех стадий, последовательно сменявших друг друга. На первой стадии промерзали верхние горизонты пород, находящиеся на ранних стадиях диагенеза. Это приводило к “отжатию воды из них и концентрации ее в наиболее благоприятных по условиям накопления воды участках” [Там же, с. 49]. Что это за участки (зоны) авторы не указывают, но, видимо, они имеют в виду слои песка, залегающие ниже пласта льда. На второй стадии промерзание пород и накопление грунтовых вод в благоприятных зонах под мерзлой толщей продолжалось. В этих зонах “на границе с тальми осадками выделялись линзы свободной воды, промерзание которых приведет к формированию пластовой залежи подземного льда” [Там же, с. 49]. М.М. Корейша и его соавторы специально подчеркивали, что “свободная вода, сформировавшая слоистую часть залежи, вряд ли имеет инъекционное происхождение” [1983, с. 77], и приводили серию признаков, подтверждающих эту позицию. При этом авторы, по-видимому, понимали, что для формирования мощных пластов льда размеры линз свободной воды должны быть очень большими. Учитывая это обстоятельство, они пишут: “Достаточно небольших объемов свободной воды при условии их пополнения из нижележащей переувлажненной толщи (вероятно, имеется в виду слой песка, залегающий ниже пласта. – С.Ф.) или с периферии” [Корейша и др., 1982, с. 49]. Каким образом и из каких источников с периферии поступала свободная вода, авторы не указывают.

На третьей стадии, в ходе дальнейшего промерзания пород, мощность мерзлой толщи, уже включавшей пласт льда, увеличивалась, повышая

тем самым давление на подстилающие ее талые породы. Следствием этого были “локальные интенсивные инъекции переувлажненного осадка или относительно чистой воды в сформировавшуюся ранее пластовую залежь” [Там же, с. 49].

Наблюдая в обнажениях различные варианты залегания пластового и инъекционного льда в жилах, М.М. Корейша и его соавторы [1983], естественно, понимали, что поток пресной воды движется снизу вверх, так как основным “поставщиком” свободной воды при формировании ледяных жил они считали песчаные слои, в которых “при диагенезе и последующем промерзании концентрируется свободная вода” [1982, с. 50]. Они пишут: “Сначала поступающая снизу вода идет на формирование пластовой залежи, а затем на формирование инъекционного льда” [Корейша и др., 1983, с. 80]. Могут ли засоленные песчаные слои морского генезиса содержать огромные объемы ультрапресной воды, необходимые для формирования мощного пласта льда и жил льда? Этот вопрос не рассматривался.

Для уточнения генезиса “ледяных и ледогрунтовых образований” М.М. Корейша с соавторами [1983] привлекают сведения о химическом составе текстурообразующих льдов в суглинках, пластовых и инъекционных льдов (см. таблицу). По химическому составу они выделяют три группы. Первая группа: в текстурообразующих льдах и ледогрунтах зоны деформации внутри пластовой залежи среди анионов преобладает Cl^- , а среди катионов – Na^+ и K^+ . Минерализация льда в ледогрунте выше, чем в текстурообразующих льдах. “Такой состав характерен и для современных осадков северных морей” [Там же, с. 84]. Вторая группа: во льду пластовой залежи среди анионов преобладает HCO_3^- , а среди катионов – Ca^{2+} . Минерализация льда 40–120 мг/л. Третья группа: в инъекционных жилах льда с малым числом минеральных примесей содержание анионов HCO_3^- и Cl^- соизмеримо, а среди катионов преобладают Na^+ и K^+ . Минерализация льда 104–105 мг/л.

Гидрокарбонатный состав и ничтожная минерализация льда в слоях пласта и жилах инъекционного льда явно указывают на континентальное происхождение воды, из которой они образовались [Фотиев, 2003]. Тем не менее М.М. Корейша и его соавторы ищут и находят признаки, указывающие на морское происхождение гидрокарбонатных вод. Ссылаясь на работу И.С. Грамберга [1968], и, видимо, разделяя его точку зрения, они пишут: “Имеются сведения, что в ходе диагенеза идет коренное преобразование морских вод в воды континентального типа” [Корейша и др., 1983, с. 84]. Развивая эту мысль, они отмечают: “Преобладание бикарбонатного иона в составе воды из льда пластовой залежи не является свидетельством континентального происхождения этих масс воды, а скорее диагенетического преобразования

Ионно-солевой состав подземных льдов в обнажениях казанцевской равнины на берегах оз. Нейто (рассчитано С.М. Фотиевым по материалам М.М. Корейши и др. [1983] и Г.И. Дубикова [1982])

№ п/п	Характеристика льда и воды	Выше или ниже кровли пласта, м	Минерализация, мг/л	Ионный состав, % экв.				Солевой состав, %				Источник сведений		
				Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Морские соли	Бикарбонаты		Сульфаты	Хлориды
<i>Текстурирующий лед в суглинках</i>														
1	–	Выше 1,0–1,5	460	11	6	83	12	4	84	39	12	–	49	[Корейша и др., 1983]
2	–	Выше 2,0	25	19	13	68	50	16	34	38	50	12	–	[Дубиков, 1982]
<i>Лед в пласте</i>														
3	Прозрачный	Ниже 0,2	41	35	35	30	62	13	25	28	62	10	–	[Корейша и др., 1983]
4	Мало минеральных включений	Ниже 0,3	120	27	41	32	65	17	28	31	55	14	–	[Там же]
5	Ледогрунт	Ниже 8,0–8,1	8500	22	8	70	–	4	96	43	–	–	57	[Дубиков, 1982]
<i>Лед в инъекционной жиле</i>														
6	Прозрачный	Ниже 1,5–2,0	105	21	10	69	42	11	47	52	40	6	–	[Корейша и др., 1983]
7	Мало минеральных включений	Ниже 2,4–2,5	104	11	23	66	28	30	42	46	28	26	–	[Там же]
8	В зоне деформации много минеральных включений	Ниже 1,0–1,3	1211	4	2	94	13	6	81	66	13	–	21	[Там же]
<i>Вода</i>														
9	Морская	–	35 000	17	3	80	1	9	90	100	–	–	–	[Дуров, 1961]
10	Озерная (сред. состав по Западной Сибири)	–	60	18	32	50	55	5	40	44	55	1	–	[Фотиев, 1999]
11	Поровый раствор	–	9222	19	17	64	7	6	87	64	7	–	29	[Дубиков, 1982]

исходных морских вод, первичный, качественный состав которых изменен еще не полностью” [Там же, с. 84]. Следовательно, по мнению М.М. Корейши и его соавторов, химический состав текстурообразующих, пластовых и инъекционных льдов – результат диагенетического преобразования морской воды.

Выводы М.М. Корейши и его соавторов практически полностью совпадают с выводами Г.И. Дубикова. Анализируя результаты изучения химического состава поровых вод и подземных льдов в обнажениях на берегах оз. Нейто, он пишет: “Тесная гидрогеохимическая взаимосвязь поровых вод с подземными льдами свидетельствует также об их парагенезисе и указывает на образование текстурообразующих и пластовых льдов за счет свободной воды, содержащейся в промерзавших осадках на ранних этапах диагенеза. Подземный лед в таком случае должен рассматриваться как элемент диагенетического преобразования водонасыщенных морских осадков в процессе их криогенной дифференциации на минеральные агрегаты, текстурообразующий, цементационный и пластовый лед” [Дубиков, 2002, с. 199].

С такими категоричными выводами Г.И. Дубикова, М.М. Корейши и его соавторов согласиться нельзя. Ссылаясь на сложные преобразования морской воды в процессе диагенеза и криогенеза, они не приводят убедительных фактов, позволяющих оценить и в полной мере понять, как и почему соленые хлоридно-натриевые морские воды с минерализацией 20–35 г/л превращаются в ультрапресные гидрокарбонатные кальциевые (натриевые) воды явно континентального происхождения.

С позиций морского происхождения воды нельзя объяснить: 1) возможность формирования мощного (до 30–40 м) пласта ультрапресного льда, кровля которого четко контактирует с подошвой мерзлых засоленных суглинков явно морского происхождения; 2) формирование слоев ледогрунта, имеющих четкие границы со слоями прозрачного льда; 3) происхождение пресных льдов в инъекционных жилах, пронизывающих пласт льда от подошвы до кровли; 4) формирование гидролакколитов, мощное ледяное ядро которых также сложено пресным льдом гидрокарбонатного состава.

Эти проблемы необходимо решать, если мы хотим разобраться в сложном механизме формирования пласта пресного льда внутри мерзлой засоленной толщи морских отложений. Причем и формирование пласта льда, и формирование инъекционных жил льда, и формирование гидролакколитов – это звенья одной цепочки, которые последовательно и закономерно сменяют друг друга. Именно поэтому всю цепочку и связанные с ней процессы необходимо изучать целиком и последовательно.

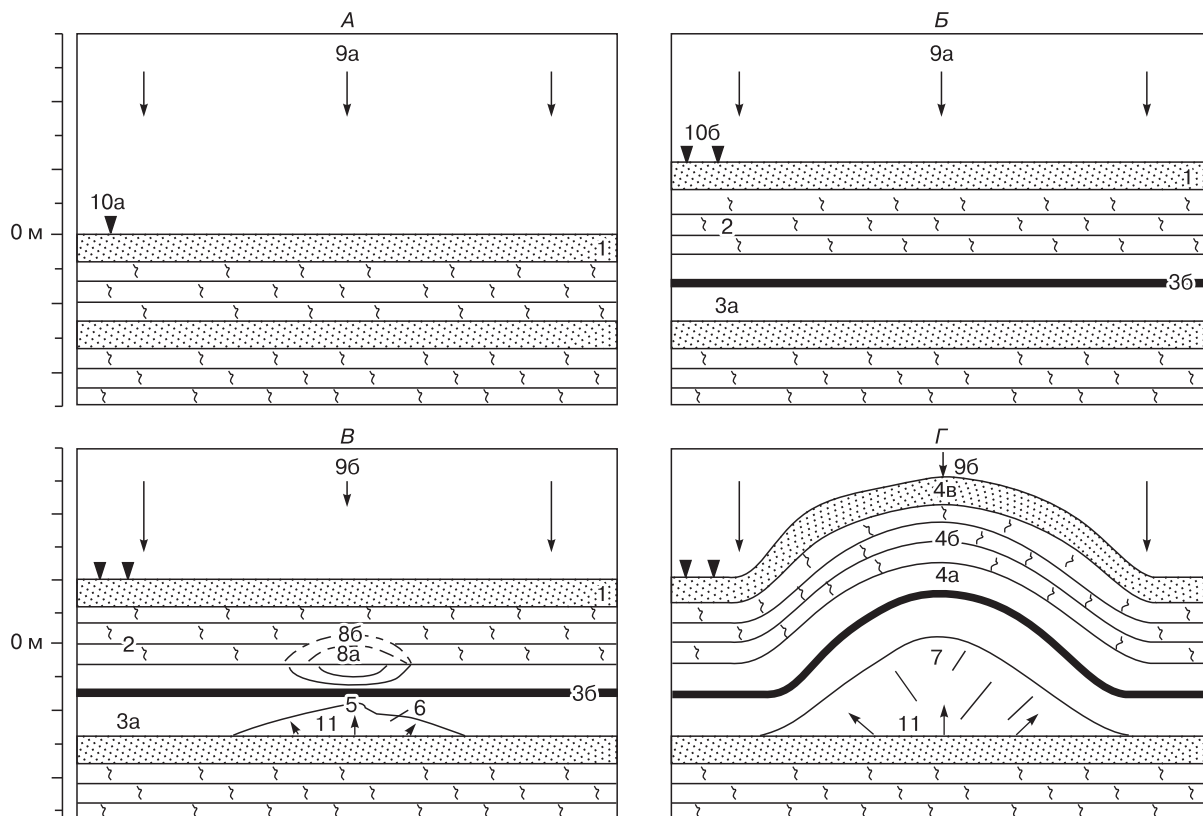


Рис. 2. Формирование криогенной толщи (А), горизонтально-слоистого пласта льда (Б), жилы льда (В) и гидролакколита (Г).

1 – горизонтальная пачка мерзлого песка; 2 – горизонтальная пачка мерзлого суглинка с сетчатой криотекстурой; 3 – горизонтальный пласт льда, состоящий из слоев прозрачного (а) и мутного (б) льда (ледогрунта); 4 – дугообразно изогнутые пласт льда (а) и пачки мерзлого суглинка (б) и песка (в); 5 – жила льда; 6 – ледяной бугор; 7 – ледяное ядро гидролакколита; 8 – зоны деформаций криогенной текстуры в пласте льда (а) и пачке мерзлых суглинков (б); 9 – равномерное (а) и неравномерное (б) промерзание пород с поверхности на всей площади формирования пласта; 10 – уровень поверхности морской равнины до (а) и после (б) формирования пласта льда; 11 – криогенное давление внутри замкнутой системы, обусловившее образование ледяного бугра.

Морские отложения казанцевского возраста, как давно отмечено геокриологами, начали промерзать (охлаждаться) либо в субмаринных, либо в субаэральных условиях в процессе регрессии моря и осушения прибрежной части суши [Втюрин, Гасанов, 1962; Дубиков, Корейша, 1964; Баулин и др., 1967, 1989; Баулин, Дубиков, 1970]. Эти отложения в останцах морской казанцевской равнины сохранились в мерзлом состоянии *in situ* до настоящего времени. Подтверждением сказанному служит значительная (до 1–2 %) засоленность всей толщи морских отложений. В свою очередь, засоленность самых верхних горизонтов морских отложений свидетельствует об устойчивом суровом климате, который на протяжении более 120 тыс. лет² обеспечивал сохранение отрицатель-

ной температуры пород и в морских отложениях, и в пласте льда [Фотиев, 2009]. Промерзание морских отложений привело к формированию криогенной толщи, состоящей из пачек мерзлых песков и суглинков (рис. 2, А).

Ранее [Фотиев, 2003] была доказана четкая генетическая связь воды, сформировавшей пласт льда, и воды в термокарстовых озерах и подозерных таликах. В несквозном талике под озером при глубоком сезонном промерзании озерной воды формировалась замкнутая система. Внутри системы при дальнейшем увеличении мощности ледяного покрова возникало огромное избыточное криогенное давление, под действием которого озерная вода или разжиженные осадки из подозерного талика могли проникать в толщу отложе-

² Мерзлые отложения и пласты льда морской салехардской равнины непрерывно существуют со второй половины среднего плейстоцена, по-видимому, более 250 тыс. лет.

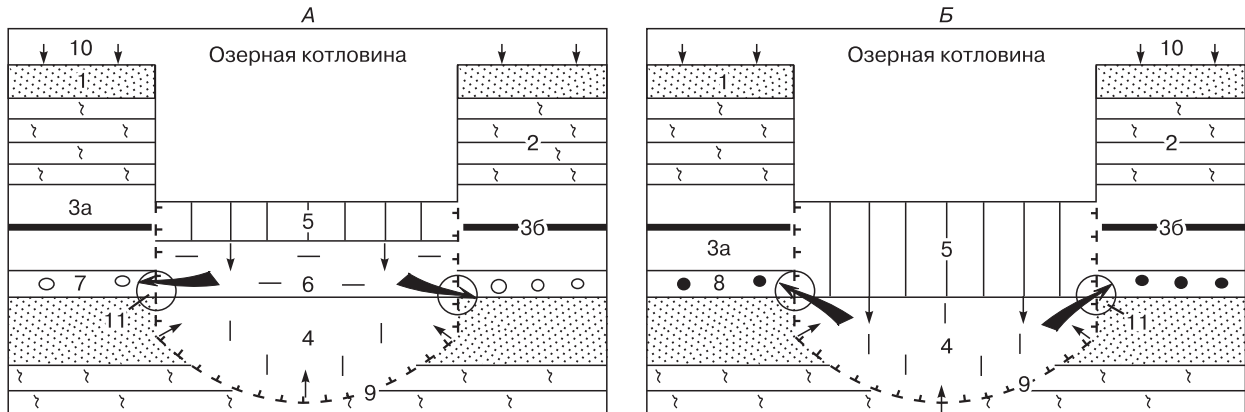


Рис. 3. Механизм формирования слоев в пласте льда.

А – формирование слоя прозрачного льда без минеральных включений; *Б* – формирование слоя мутного льда с большим содержанием минеральных включений.

1 – пачка мерзлого песка; 2 – пачка мерзлого суглинка с сетчатой криотекстурой; 3 – пласт льда, состоящий из слоев прозрачного (*а*) и мутного (*б*) льда (ледогрунта); 4 – таберальные образования, насыщенные водой, внутри замкнутого промерзающего водоема с нарастающим криогенным давлением; 5 – озерный лед; 6 – озерная вода; 7 – слой прозрачной воды; 8 – слой мутной воды; 9 – граница несквозного подозерного талика; 10 – равномерное промерзание пород с поверхности на всей площади формирования пласта; 11 – зоны контакта подошвы ледяного пласта и пачки мерзлых песков – пути внедрения воды, идущей на формирование пласта льда, в толщу мерзлых отложений.

ний к подошве пласта льда либо по водоносному пласту в морских песках³, либо над ним. Скорее всего, озерная вода проникала к подошве пласта льда, не фильтруясь через песчаные слои, а свободным потоком по кровле промерзшей пачки песков. Подтверждением сказанному служит наличие слоев ледогрунта в пласте льда (3б на рис. 2, *Б*) и наличие окатанных агрегатов суглинка в жиле льда (9 на рис. 1, *А*). Если бы озерная вода проникала к подошве пласта льда, фильтруясь через пачку песков, то никаких бы включений суглинка не могло быть ни в слоях ледогрунта в пласте льда, ни в жиле льда (5 на рис. 1, *Б*).

Вода, поступавшая к подошве ледяного пласта, ровным слоем растекалась по кровле пачки мерзлых песков на различное, иногда значительное расстояние от источника питания. Тонкий слой воды промерзал быстро и равномерно по всей площади, видимо, в условиях достаточно низкой температуры. Когда мощность льда в озере была меньше глубины озера, к подошве пласта поступала прозрачная озерная вода без примесей – формировался очередной слой прозрачного льда (рис. 3, *А*). Когда вода в озере промерзала до дна, к подошве пласта льда из подозерного талика поступала мутная вода или разжиженные осадки, в составе которых содержание минеральных включений (суглинков или глин) могло достигать 40–

60 % (см. рис. 3, *Б*). В пласте формировался слой ледогрунта, в ионно-солевом составе которого обнаружены криометаморфизованные морские воды⁴, содержащие хлориды (см. таблицу) [Фотиев, 1996]. Именно поэтому слои прозрачного и мутного льда (ледогрунта) разделены четкой границей (см. рис. 2, 3).

Аналогом этого процесса в современных условиях может служить процесс формирования наледи, суть которого, как известно, последующее замерзание слоя воды, излившейся на поверхность наледной поляны. И в теле наледи, и в пласте льда прослои льда формируются по мере поступления очередной порции воды, которая ровным слоем растекается по поверхности. Толщина слоя воды определялась объемом одновременно поступившей воды и площадью растекания. Промерзание нового слоя воды в теле наледи и пласте льда в основном происходит сверху. Разница заключается только в том, что в наледи мощность пласта льда наращивается сверху, так как новый слой льда формируется вдоль верхней поверхности наледи, а в пласте мощность льда наращивается снизу, так как новый слой льда формируется вдоль поверхности подошвы пласта. Но в обоих случаях оси большинства кристаллов льда в новообразованных слоях льда ориентированы перпендикулярно напластованию слоев льда. Это подтверждается

³ Вероятно, этим процессом можно объяснить происхождение тонких слоев песка, часто залегающих на кровле пласта льда. Мощность линз песка достигает 5–10 см [Баулин и др., 1967, 1989; Баулин, Дубиков, 1970; Баду и др., 1982; Дубиков, 1982; Корейша и др., 1982].

⁴ Криометаморфизованные морские воды, содержащиеся в поровых растворах и текстурообразующих льдах мерзлых суглинков, накапливались в таберальных образованиях при формировании термокарстовых озер на молодой морской равнине.

кристаллооптическими наблюдениями в пласте льда, изученного в среднем течении р. Сеяха [Дубиков, Корейша, 1964].

Равномерное промерзание слоя воды, разлившаяся по кровле криогенного водоупора, обуславливало равномерное площадное пучение поверхности морской равнины на значительной площади. Поверхность равнины приподнималась на толщину каждого слоя. Абсолютные отметки поверхности морской равнины после формирования пласта льда увеличились на величину мощности пласта льда, т. е. от нескольких метров до 40–50 м. При этом горизонтальная слоистость не нарушалась ни в пласте льда, ни в пачке мерзлых суглинков (см. рис. 2, Б).

Такой процесс формирования ледяного пласта продолжался до тех пор, пока в природе сохранялись по крайней мере три условия. *Первое* – наличие значительного объема воды в озере, достаточного для формирования многочисленных слоев льда на всей площади пласта. Только при соблюдении этого условия могли сформироваться пласты льда мощностью до 50 м и пласты с объемом льда в несколько миллионов кубометров. О том, что на поверхности морских равнин такое условие имело место, свидетельствует обилие крупных современных озер и древних котловин. “Это огромные воронки глубиной в несколько десятков метров и 20–30 км в поперечнике” [Бадю и др., 1982, с. 16]. *Второе* – совпадение отметок уровня воды в озере и контактных зон “суглинки–пески” (начальный период), а затем “пласт льда–пески”, по которым озерные воды проникали в толщу мерзлых морских отложений (11 на рис. 3)⁵. *Третье* – равномерное (по глубине и скорости) охлаждение пород, залегающих выше пласта, обеспечивающее равномерное промерзание слоя воды и образование очередного слоя льда одинаковой мощности на всей площади пласта (см. рис. 2, Б).

При нарушении первого и второго условий формирование пласта льда заканчивалось, так как прекращался доступ воды к подошве пласта. Нарушение третьего условия (при сохранении условий доставки воды к подошве пласта) неизбежно приводило к неравномерному промерзанию слоя воды, разливающейся под пластом. Вблизи подошвы пласта льда возникали замкнутые, промерзающие водоемы (системы) с избыточным криогенным давлением. При замерзании воды в замкнутых системах формировались бугры пучения. Их размеры определялись объемом промерзающей воды в замкнутых водоемах (системах). Аналогом этого криогенного процесса могут служить современные бугры пучения. Небольшие по размерам бугры формируются внутри наледи, деформируя отдельные горизонтально залегающие слои льда.

Бугры пучения больших размеров – гидролакколиты – обычно образуются в днищах речных долин в результате неравномерного промерзания пород, фильтрующих подрусловой поток подземных вод [Фотиев, 1965].

Ледяной пласт, залегающий над промерзающим водоемом, под действием мощного криогенного давления либо “лопался” с образованием зияющих трещин, пронизывающих пласт от подошвы до кровли (см. рис. 2, В), либо дугообразно изгибался с образованием гидролакколита (см. рис. 2, Г). В первом случае напорная вода по трещине свободно проникала до кровли пласта, воздействуя на лед пласта и нижние слои в пачке мерзлых суглинков. В трещине после замерзания воды формировалась ледяная жила, пронизывающая пласт льда от подошвы до кровли. Во втором случае формировался гидролакколит, воздействие которого на пласт льда и пачку мерзлых суглинков будет рассмотрено ниже.

Изученная М.М. Корейшей ледяная жила (см. рис. 1, А) наглядно иллюстрирует один из результатов деформации пласта льда под воздействием криогенного давления. Ее размещение относительно пласта льда и пачки мерзлых суглинков убедительно свидетельствует о том, что она, как и все жилы, рассекающие пласт льда от подошвы до кровли, формировались в континентальных условиях после образования пачки мерзлых глин и пласта льда.

Механизм формирования этой инъекционной жилы льда и деформаций в пласте льда и пачки мерзлых суглинков, можно представить следующим образом. Пласт льда, под воздействием криогенного напора, возникшего в промерзающем водоеме ниже подошвы пласта, “лопнул”. В пласте льда образовалась зияющая трещина толщиной всего 5–10 см (4 на рис. 1, А). Поток воды, обладающий значительным напором, поднялся по трещине до кровли пласта и нанес гидравлический удар по подошве пачки мерзлых суглинков. Внедрение потока инъекционной воды в пласт льда, по видимому, было одноразовым и кратковременным. Тем не менее гидравлический удар водного потока был значительным, так как при сравнительно небольшой толщине водоносной трещины над ней в мерзлых суглинках сформировался купол, в пределах которого слои мерзлого суглинка прогнуты вверх (6а на рис. 1, А). Высота купола 1,5 м от кровли пласта льда.

В результате отепляющего воздействия внедрившейся воды лед кровли пласта вблизи трещины растаял – сформировался временный водоем. О размерах водоема можно судить по размерам зоны деформаций в пласте льда (7 на рис. 1, А). Глубина водоема 1 м, ширина 2 м. Под отепля-

⁵ В настоящее время “котловины озер занимают одинаковое высотное положение в разрезе с пластовыми залежами льда” [Бадю и др., 1982, с. 16].

ющим воздействием водоема расположенные над ним нижние слои пачки мерзлых суглинков протаяли и прогнулись вниз (6б на рис. 1, А). Самые нижние слои суглинков, контактирующие с водой, отрывались от подошвы слоя и погружались в воду. Вот откуда в зоне деформаций пласта во льду оказались крупные (до 10 см) угловатые блоки суглинка (8 на рис. 1, А)! Наличие “плавающих” блоков суглинка во льду свидетельствует о непродолжительности существования временного водоема и быстром промерзании воды при достаточно низкой температуре пород и льда (блоки суглинка не успели выпасть в осадок).

Величина криогенного напора водного потока, видимо, оказалась недостаточной для того, чтобы деформировать всю 15–20-метровую пачку мерзлых суглинков, перекрывающих пласт льда. Это подтверждается практически горизонтальной слоистостью верхних горизонтов суглинков и песков, залегающих непосредственно выше зоны деформации (1 и 2 на рис. 1, А).

Вторая жила инъекционного льда расположена в том же обнажении (см. рис. 1, Б). Она рассекает тот же пласт льда на расстоянии всего 6–8 м от первой жилы (см. рис. 1, А). Вторая жила изучена, а главное, описана менее детально по сравнению с первой. Тем не менее на рис. 1, Б отчетливо видно, что она резко отличается от первой жилы практически по всем показателям. Во-первых, она выполнена ледогрунтом (5 на рис. 1, Б). Во-вторых, ее значительная толщина (1,7–1,8 м), скорее всего, свидетельствует о неоднократном внедрении в пласт льда однородного по составу разжиженного суглинка, состав которого отличается от состава суглинков в кровле пласта льда. В-третьих, разжиженные суглинки проникали в пласт льда до его кровли по трещине, наклоненной к горизонтальной плоскости кровли под углом всего 40°, а не 90°, как в жиле на рис. 1, А.

При такой большой (1,7–1,8 м) толщине инъекционной жилы льда следовало бы ожидать формирования значительных по размерам зон деформации и в пачке суглинков, и в пласте льда. Однако зарисовка обнажения на рис. 1, Б убедительно показывает, что этого не произошло. Зона деформации в пачке суглинков ограничена, ее мощность всего 1 м (6в на рис. 1, Б). В этой зоне, залегающей непосредственно над жилой, первичные криогенные текстуры суглинков сильно преобразованы, а в подошве (на контакте с кровлей ледяного пласта) отмечаются тонкие (до 5 см) скопления различных по составу суглинков как из нижнего горизонта пачки суглинков, так и привнесенные водным потоком. Наиболее крупные скопления таких суглинков отмечаются в пределах “расклинивающей зоны деформации пласта и кровли” на участке первого внедрения разжиженного суглинка (10 на рис. 1, Б) [Корейша и др.,

1983]. Нет заметных деформаций криогенной текстуры и в пласте льда.

Следовательно, величина деформации пластов льда и перекрывающих их суглинков определялась не толщиной жилы, а углом ее наклона по отношению к контакту пласта льда и суглинков и мощностью гидравлического удара. Наиболее значительные деформации возникали в случае вертикального расположения трещины, по которой поступала вода [Корейша и др., 1982, 1983].

ДЕФОРМАЦИИ СЛОЕВ В ПЛАСТЕ ЛЬДА И ГИДРОЛАККОЛИТЫ

Во многих обнажениях пластовых льдов хорошо видно, что слои некогда горизонтально залегающего пласта сильно деформированы. В низовьях р. Сеяха такие пластовые льды изучены в останцах третьей морской террасы. Г.И. Дубиков пишет: “В обнажениях террасы на фоне протяженной (около 600 м) горизонтальной пластовой залежи прослежены куполовидные складки. Ядро складок сложено чистым льдом, смятым в микроскладки ледогрунтом, и льдом с примесью грунтовых частиц, а крылья – льдистыми глинами, слои которых повторяют конфигурацию кровли ледяного ядра. Крылья складок наклонены под разными углами (от 12 до 50°); в поперечном разрезе складки измеряются первыми десятками метров” [1982, с. 27].

К настоящему времени высказано несколько гипотез и сделано много предположений о причинах и механизмах формирования этих дислокаций. Г.И. Дубиков, например, образование складок в пластах льда объясняет явлением криодиапиризма. Суть этого явления, по его мнению, заключается в следующем. «В процессе эпигенетического промерзания влажных пород формирующийся мерзлый экран приводит к накоплению отжатых при уплотнении осадков грунтовых вод в регионально или локально развитых породах-коллекторах, или в виде линз чистой воды на границе раздела песчаных и глинистых или мерзлых и талых пород. “Запечатанные” таким путем объемы грунтовых вод в осадочной толще испытали на себе резкое усиление постоянно растущего давления (напора) и являлись источником образования пластовых залежей льда сегрегационного типа на первых этапах сработки запасов водонасыщенного слоя. С продвижением фронта промерзания вглубь давление в системе порода–вода превышало прочность мерзлой кровли, происходил локальный изгиб слоев с образованием складок или разрыв сплошности мерзлой толщи на участках с максимальным сосредоточением напора. Поднятие или прорыв слоев и потеря какого-то объема пластовых вод осадочного чехла представляет собой природный процесс выравнивания давления, переход в новое временно уравновешенное состояние про-

мерзавших осадочных толщ. Таким образом, криодиапиризм – это субвертикальное перемещение грунтовых растворов (вод) в промерзающих дисперсных породах к поверхности Земли в результате напорной миграции, возникающей под действием криогенного напора (давления). Проявление криодиапиризма характерно для ранних стадий существования рыхлых водонасыщенных осадков» [Дубиков, 1982, с. 27]. Другие геокриологи объясняют деформации пласта льда формированием внутри него гидролакколитов [Бадю и др., 1982; и др.]. По мнению Л.Н. Крицук, изучавшей залежи подземных льдов и на Ямале, и на Гыдане, “кулообразные вздутия ледяного тела” приурочены к “зонам глубинных разломов” и свидетельствуют об их “тектонической обусловленности” [2010, с. 173].

Заслуживает внимания оригинальное обнажение казанцевских отложений с залежью подземного льда, исследованное Ю.К. Васильчуком в долине р. Еркутаяха (Южный Ямал). В обнажении высотой 18–20 м (рис. 4) вскрывается лед двух типов: “в центральной части это шток деформированного льда вертикального направления, а на контакте с ним по обеим сторонам вскрыта дислоцированная слоистая пластовая залежь” [Васильчук, 2011, с. 44]. Слоистый лед в дистальных частях залежи контактирует со штоком по крутонаклонному контакту. По классификации Ю.К. Васильчука [2011, с. 44], это “гетерогенная

пластовая залежь с парагенетическим сочетанием автохтонного сегрегационного ледяного пласта (в дистальных частях. – С.Ф.) и автохтонного инъекционного пластового льда (в апикальной части. – С.Ф.)...” Однако при внимательном изучении фотографии (см. рис. 4) можно увидеть совсем другую картину. В этом береговом обрыве обнажается полный поперечный разрез мощного гидролакколита с усеченным куполом. В его центральной части размещается мощное ледяное ядро, а в краевых частях – пласты слоистого льда и мерзлых сильнольдистых суглинков, контактирующих с ледяным ядром по крутонаклонной поверхности. Гидролакколит образовался в результате промерзания слоя воды, поступившей к подошве пласта из ближайшего термокарстового озера⁶. Криогенный напор, возникший внутри промерзающего замкнутого объема воды, был огромным, так как под его воздействием прогнулись и горизонтально залегающий пласт льда, и толща мерзлых суглинков. Диаметр гидролакколита в его нижней (видимой) части превышал 30 м, а его высота (от подошвы ледяного пласта) была более 20–25 м. Судя по наклону склонов ледяного ядра (см. рис. 4), не исключается возможность образования бугра и на ровной поверхности казанцевской равнины. Однако в результате активных и продолжительных процессов термоденудации и термоплатации морские отложения на поверхности древней равнины

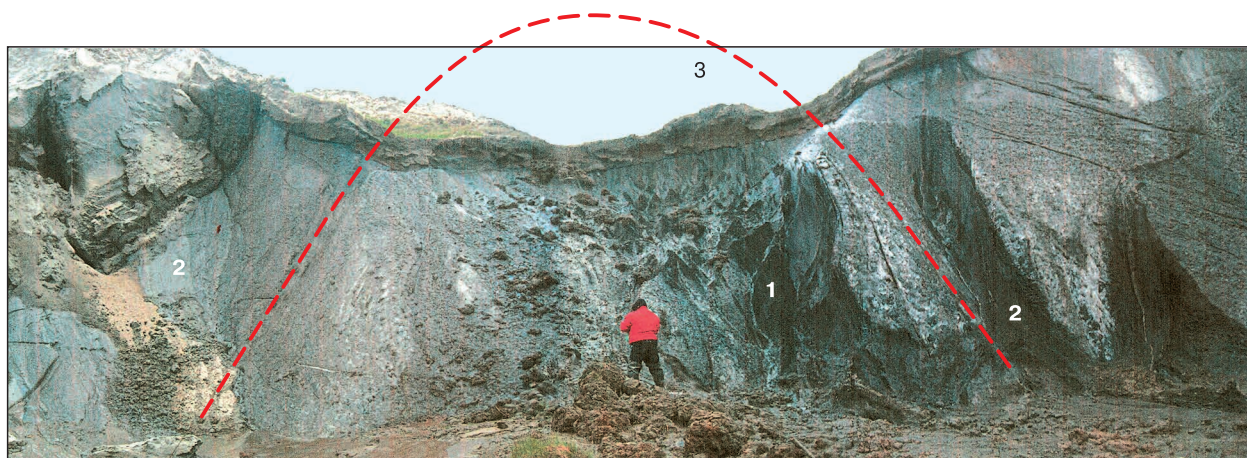


Рис. 4. Поперечный разрез гидролакколита с усеченным куполом на левом берегу р. Еркутаяха (Южный Ямал).

1 – ледяное ядро гидролакколита; 2 – слоистый пласт льда; 3 – возможная граница кровли ледяного ядра гидролакколита и подошвы слоистого пласта льда.

Интерпретация С.М. Фотиева фотографии Ю.К. Васильчука, помещенной на обложке журнала “Криосфера Земли”, № 1, 2011.

⁶ Палиноспектры, изученные А.К. Васильчук в пласте льда и ледяном ядре гидролакколита, указывают на “доминирование пыльцы карликовой березки, ольховника, злаков, осок и спор зеленых мхов (14–25 %), участие пыльцы верескоцветных (3–10 %), практически полное отсутствие пыльцы древесных пород...” [Васильчук, 2011, с. 45]. Это типично тундровый характер палиноспектров, указывающий на континентальное (озерное) происхождение воды, участвующей в формировании пласта льда и ядра гидролакколита.

были частично разрушены и переотложены, а пласт льда над ледяным ядром и верхняя часть ледяного ядра растаяли. В настоящее время оставшаяся часть ледяного ядра перекрывается лишь тонким слоем песка (см. рис. 4).

Аналогичная ледяная залежь изучена в низовьях р. Юрибей на участке, где река подмывает третью террасу. Ледяная залежь обнаружена в вертикальной стене цирка, ширина которого 20 м. По описанию В.В. Баулина и Г.И. Дубикова [1970], в центральной и правой частях цирка обнажается ледяное тело. Высота его 6 м⁷, ширина основания на высоте 6–7 м над урезом воды в реке – 15–16 м, а на вершине (вблизи современной поверхности террасы) – 6–7 м. Лед, слагающий ледяное тело, массивный прозрачный с крупными (диаметром до 8–10 см) кристаллами льда. В левой части цирка залегает пласт слоистого льда, в котором слой мутного и чистого льда толщиной до 5–10 см чередуются с тонкими прослоями минеральных частиц, и пачка слоистых суглинков, слой которого параллельны слоям в пласте льда. Угол наклона пласта льда и пачки мерзлых суглинков составляет 60–80°.

По мнению В.В. Баулина и Г.И. Дубикова [1970, с. 189], формирование таких “сложных по генезису залежей льда” происходит следующим образом. “При промерзании глинистых отложений, подстилаемых на глубине 10–30 м водоносными песками, на первом этапе формировалась параллельно-слоистая часть залежи за счет миграции воды. Дальнейшее промерзание водоносного горизонта и увеличение давления в водоносном пласте привели к разрыву кровли глинистых пород, внедрению воды и образованию штока массивного льда. При этом пласт слоистого льда вместе с покрывающими отложениями изменил горизонтальное положение на наклонное” [Там же, с. 189]. Согласиться с таким генезисом воды, участвующей в формировании пластовой залежи, нельзя, так как запасов воды в пачке водоносного песка, безусловно, не хватит на формирование и пласта, и штока льда.

При изучении этого обнажения В.В. Баулин и Г.И. Дубиков, видимо, не обратили внимания на то, что в цирке обнажается почти полный поперечный разрез усеченного купола крупного бугра пучения – гидролакколита. В центральной и правой частях цирка обнажается мощное, практически вертикальное ледяное ядро гидролакколита, а в его левой части – пласт льда и пачка мерзлых суглинков, залегающих на склоне гидролакколита. Вот почему слой льда и суглинка залегают с наклоном 60–80°! Гидролакколит образовался под пластом льда в результате промерзания слоя воды,

поступившей к подошве пласта из ближайшего термокарстового озера.

Так же как и в долине р. Юрибей, в результате активных и продолжительных процессов термоденудации и термопланации, горизонтально залегающие мерзлые морские отложения на поверхности третьей террасы были частично разрушены и переотложены, а пласт льда (над гидролакколитом) и верхняя часть ледяного ядра растаяли. На усеченном куполе гидролакколита в 1969–1970 гг. лежал фирнизированный снежник и трехметровый слой покровных суглинков.

Геокриологические разрезы отложений казанцевского и зыряно-каргинского возраста в долинах рек Еркутаяха и Юрибей наглядно иллюстрируют: во-первых, закономерную последовательность формирования сначала пачки мерзлых суглинков, затем пласта льда, а в завершающей стадии формирования пласта льда – крупных гидролакколитов; во-вторых, мощную деформацию (угол наклона слоев до 80°) некогда горизонтально залегающих пластов льда и пачки мерзлых суглинков в результате формирования крупных гидролакколитов, ледяное ядро которых дугообразно изогнуло и пласт льда, и пачку мерзлых суглинков; в-третьих, результаты интенсивного развития термоденудационных процессов, которые переотложили отложения верхних горизонтов морской равнины и третьей террасы и ликвидировали пласт льда над гидролакколитом и верхнюю часть его ледяного ядра.

Во многих береговых обрывах изучены горизонтально залегающие пласты льда и пачки мерзлых суглинков, плавно переходящие в крутонаклоненные. В таких обнажениях вскрываются деформированные пласты льда и суглинков, расположенные на склонах гидролакколита.

При промерзании в замкнутых водоемах вблизи подошвы пласта небольших объемов воды формировались незначительные по размерам ледяные бугры, деформирующие только один или несколько вышележащих слоев льда. Здесь опять уместно сравнение с ледяными буграми, которые часто наблюдаются в теле современной наледи. Бугры сформировались в результате неравномерного промерзания слоя воды, излившейся на поверхность наледи: затем они были перекрыты горизонтально залегающими слоями наледного льда.

ВЫВОДЫ

Внимательное ознакомление с описанием береговых обнажений казанцевской морской равнины и третьей морской террасы, изученных Ю.Б. Баду, В.В. Баулиным, Г.С. Брыксиной, Ю.К. Васильчуком, Г.И. Дубиковым, М.М. Корей-

⁷ Нижняя часть ледяного ядра скрыта под осыпью, а верхняя уничтожена процессами термопланации и термоденудации вместе с пластом льда и пачкой мерзлых льдистых суглинков.

шей, С.Ю. Пармузиным, С.Е. Суходольским, В.Т. Трофимовым, А.Н. Хименковым и другими геокриологами, позволило изучить механизм формирования пласта льда, инъекционных жил льда и гидролакколитов и увидеть результаты воздействия инъекционного потока воды, внедрившегося в пласт льда, на лед пласта и на слои пачки мерзлых суглинков и песков.

- Пласты слоистого льда, инъекционные жилы льда и гидролакколиты сформировались в толще мерзлых морских отложений за счет промерзания слоя воды, поступившей из ближайшего термокарстового озера к подошве пласта по зоне контакта пласта льда с пачкой мерзлого песка.

- Инъекционные жилы льда и крупные гидролакколиты образовались после завершения формирования пласта льда.

- При равномерном промерзании слоя воды с поверхности на подошве пласта льда формировался очередной слой льда, мощность пласта льда увеличивалась снизу.

- При неравномерном промерзании слоя воды с поверхности под пластом льда формировались замкнутые водоемы, внутри которых при дальнейшем промерзании воды развивалось огромное криогенное давление.

- Под действием криогенного давления пласт льда либо “лопался” с образованием зияющих трещин, либо дугообразно изгибался с проявлением бугров пучения (гидролакколитов). При образовании трещин вода, обладая значительным напором, свободно проникала по трещинам до кровли пласта, деформируя ледяные слои пласта вблизи трещины и слои суглинков непосредственно над ней. При замерзании воды в трещине в пласте льда формировалась инъекционная жила льда, пронизывающая его от подошвы до кровли. После образования гидролакколита вода, заполнявшая его купол, замерзала – формировалось мощное ледяное ядро. На склонах гидролакколита некогда горизонтально залегающие слои льда и мерзлого суглинка деформировались, изгибаясь иногда вплоть до вертикального залегания.

- Формирование гидролакколитов под подошвой пласта льда – основная причина деформации слоев в пласте льда и в пачке мерзлых суглинков.

Литература

Баду Ю.Б., Трофимов В.Т., Васильчук Ю.К. Основные закономерности распространения и типы пластовых залежей подземного льда в северной части Западно-Сибирской плиты // Пластовые льды криолитозоны. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1982, с. 13–24.

Баулин В.В., Белопухова Е.Б., Дубиков Г.И., Шмелев Л.М. Геокриологические (мерзлотные) условия Западно-Сибирской низменности. М., Наука, 1967, 214 с.

Баулин В.В., Васильчук Ю.К., Дубиков Г.И. и др. Пластовые залежи подземного льда // Геокриология СССР. Западная Сибирь. М., Недра, 1989, с. 103–111.

Баулин В.В., Дубиков Г.И. Пластовые залежи подземного льда // Труды ПНИИИС. М., 1970, т. II, с. 175–193.

Васильчук Ю.К. Гомогенные и гетерогенные пластовые ледяные залежи в многолетнемерзлых породах // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 1, с. 40–51.

Втюрин Б.И. Подземные льды СССР. М., Наука, 1975, 214 с.

Втюрин Б.И., Гасанов Ш.Ш. К истории формирования многолетнемерзлых пород Нижне-Анадырской низменности // Труды Ин-та мерзлотоведения им. В.А. Обручева АН СССР. М., 1962, т. 18, с. 45–52.

Гасанов Ш.Ш. К проблеме происхождения пластовых залежей подземного льда // Пластовые льды криолитозоны. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1982, с. 3–13.

Геологический словарь. М., Изд-во ГНТИ, 1955, т. II, 446 с.

Гляциологический словарь. Л., Гидрометеиздат, 1984, 528 с.

Грамберг И.С. Основные направления диагенетического преобразования поровых вод и поглощаемого комплекса морских отложений // Физические и химические процессы и фации. М., Наука, 1968, с. 68–84.

Дубиков Г.И. Парагенез пластовых льдов и мерзлых пород Западной Сибири // Пластовые льды криолитозоны. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1982, с. 24–42.

Дубиков Г.И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. М., ГЕОС, 2002, 246 с.

Дубиков Г.И., Корейша М.М. Ископаемые инъекционные льды на полуострове Ямал // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1964, № 5, с. 58–65.

Дуров С.А. Синтез в гидрохимии. Происхождение солевого состава природных вод. Ростов н/Д, Кн. изд-во, 1961, 248 с.

Корейша М.М., Хименков А.Н., Брыксина Г.С. Пластовые комплексы подземных льдов в районе озера Нейто (п-ов Ямал) // Пластовые льды криолитозоны. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1982, с. 42–51.

Корейша М.М., Хименков А.Н., Брыксина Г.С. Условия залегания и строение пластовых залежей пластового льда района оз. Нейто (п-ов Ямал) // Вопросы региональной и инженерной геокриологии. М., Стройиздат, 1983, с. 73–88.

Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири. М., Науч. мир, 2010, 352 с.

Пармузин С.Ю., Суходольский С.Е. Пластовые льды среднего Ямала и их роль в формировании рельефа // Пластовые льды криолитозоны. Якутск, Кн. изд-во, 1982, с. 51–61.

Фотиев С.М. Подземные воды и мерзлые породы Южно-Якутского угленосного бассейна. М., Наука, 1965, 230 с.

Фотиев С.М. Закономерности криогенной метаморфизации химического состава морской воды // Криолитозона и подземные воды Сибири. Якутск, ИМЗ СО РАН, 1996, ч. II, с. 16–26.

Фотиев С.М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 2, с. 40–65.

Фотиев С.М. Генезис пластов льда в морских отложениях Ямала // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 1, с. 63–75.

Фотиев С.М. Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты). Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2009, 279 с.

Поступила в редакцию
12 ноября 2010 г.